



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

REGULAČNÍ SYSTÉMY TURBODMYCHADEL

TURBOCHARGER CONTROL SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zuzana Fraňová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Studentka: **Zuzana Fraňová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Regulační systémy turbodmychadel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Soustředit informace o regulačních systémech zvyšujících účinnost turbodmychadel při nestacionárních provozních stavech motoru a provést jejich kritické zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

Popsat funkci a význam turbodmychadla.

Popsat princip činnosti a konstrukci turbodmychadla.

Popsat regulační systémy zvyšující účinnost přepřínování při změně zatížení motoru (WG, VNT, VGT).

Popsat ovládací prvky pro regulační systémy (akční členy, REA, SREA).

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

KÖEHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

HAFNER, Karl Ernst a MAASS, Harald. Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschinen. Wien, New York: Springer Verlag, 1995. 424 s. ISBN 978-3-7091-7468-5.

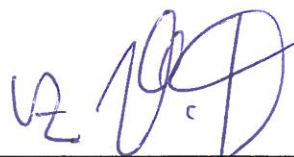
SKOTSKY, Alexander A. Automotive engines: control, estimation, statistical detection. Berlin: Springer Verlag, 2009. 215 s. ISBN 978-3-642-00163-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 7. 10. 2017



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca je rešeršnej povahy a primárne zameraná na regulačné systémy turbodúchadiel. Práca je rozdelená na dve hlavné časti. Prvá časť je zameraná na obecnú problematiku preplňovania pomocou turbodúchadla a druhá časť sa zaoberá regulačnými systémami turbodúchadiel (wastegate, VNT, VGT) a ich ovládacími prvkami.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

turbodúchadlo, wastegate, VNT, VGT, aktuátor, REA, SREA

ABSTRACT

This thesis is of a search character with primary focus on turbocharger control systems. The work is divided into two main parts. The first part is focused on turbocharging fundamentals and the second part deals with turbocharger control systems (wastegate, VNT, VGT) and actuation of these systems.

KEYWORDS

turbocharger, wastegate, VNT, VGT, actuator, REA, SREA

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

FRAŇOVÁ, Z. *Regulační systémy turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 29 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc..

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením prof. Ing. Václava Píštěka, DrSc. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25. mája 2018

.....

Zuzana Fraňová

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcela poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc. za rady poskytnuté pri tvorbe tejto bakalárskej práce a tiež mojim kolegom v práci za cenné skúsenosti a informácie.

OBSAH

Úvod	9
1 Preplňovanie motoru turbodúchadlom	10
1.1 Funkcia a význam turbodúchadla	10
1.2 Princíp činnosti turbodúchadla	11
1.3 Konštrukcia turbodúchadla	11
1.3.1 Turbínová časť	12
1.3.2 Ložisková časť	13
1.3.3 Kompresorová časť	14
2 Regulácia plniaceho tlaku turbodúchadla	16
2.1 Wastegate	16
2.1.1 Externý wastegate	16
2.1.2 Interný wastegate	17
2.2 VNT	18
2.2.1 Konštrukcia VNT	18
2.2.2 Princíp regulácie plniaceho tlaku pomocou VNT	19
2.2.3 VNT v zážihových motoroch	19
2.3 VGT	20
2.4 Ovládacie prvky regulačných systémov	21
2.4.1 Pneumatický aktuátor	21
2.4.2 REA/SREA	22
2.5 Porovnanie regulačných systémov	23
2.6 Trendy a vývoj regulačných systémov v budúcnosti	24
Záver	26
Zoznam použitých skratiek a symbolov	29

ÚVOD

Súčasným trendom v automobilovom priemysle je tzv. downsizing. Jeho význam spočíva v použití menšieho motoru, ktorý poskytuje rovnaký, prípadne väčší výkon ako motor väčších rozmerov. Efektívnym spôsobom zmenšovania objemu motoru a znižovania počtu valcov je využitie preplňovania motoru pomocou turbodúchadla. Turbodúchadlo dokáže zužitkovať výfukové plyny, ktoré by inak zostali nevyužitú, ako zdroj energie pre zvyšovanie množstva vzduchu dodávaného do motora, čím pomáha zlepšiť spotrebu paliva bez obetovania výkonu. Vďaka tomu je turbodúchadlo aj jedným zo základných krokov pre splnenie stále prísnejších noriem týkajúcich sa emisií vypúšťaných do ovzdušia. Práve významu, princípu činnosti a konštrukcii turbodúchadla je venovaná prvá časť tejto práce.

Druhá časť je venovaná niekoľkým spôsobom regulácie plniaceho tlaku turbodúchadla (wastegate, VNT, VGT), ktoré pomáhajú optimalizovať rýchlosť a tlak výfukových plynov a maximalizovať tak výkon, znížiť spotrebu pohonných hmôt a emisií a zároveň udržať otáčky turbodúchadla v bezpečných hodnotách. V tejto časti sú spomínané aj najčastejšie používané ovládacie prvky, ktoré slúžia na riadenie regulácie a majú teda nezanedbateľný vplyv na fungovanie celého turbodúchadla. Záver tejto časti je venovaný porovnaniu spomínaných spôsobov regulácie a pohľadu na súčasné trendy a budúci vývoj v tejto oblasti.

1 PREPLŇOVANIE MOTORU TURBODÚCHADLOM

Nepreplňovaný spaľovací motor produkuje veľké množstvo nevyužitého tepla. Spaľovací proces vo valci uvoľňuje tepelnú energiu, ktorá prechádza v podobe výfukových plynov výfukovým potrubím priamo do ovzdušia. Táto nevyužitá výfuková energia môže byť zužitkovaná pomocou turbodúchadla, ktoré je jedným z najzákladnejších spôsobov preplňovania spaľovacieho motoru.

1.1 FUNKCIA A VÝZNAM TURBODÚCHADLA

Výkon spaľovacieho motoru závisí od množstva vzduchu a paliva, ktoré je privedené do motoru na spálenie. To znamená, že výkon môžeme zvýšiť zvýšením otáčok motora, zväčšením jeho zdvihového objemu alebo zvýšením plniacej účinnosti motora. Zväčšovanie zdvihového objemu motora je nevýhodné z toho dôvodu, že vedie k zvýšeniu hmotnosti a zväčšeniu rozmerov motora. Zvýšenie otáčok motora je limitované hlavne strednou piestovou rýchlosťou, ktorá v značnej miere ovplyvňuje životnosť motora. Najvýhodnejšie je preto zvýšenie výkonu motora zlepšením plnenia valcov pomocou preplňovania.

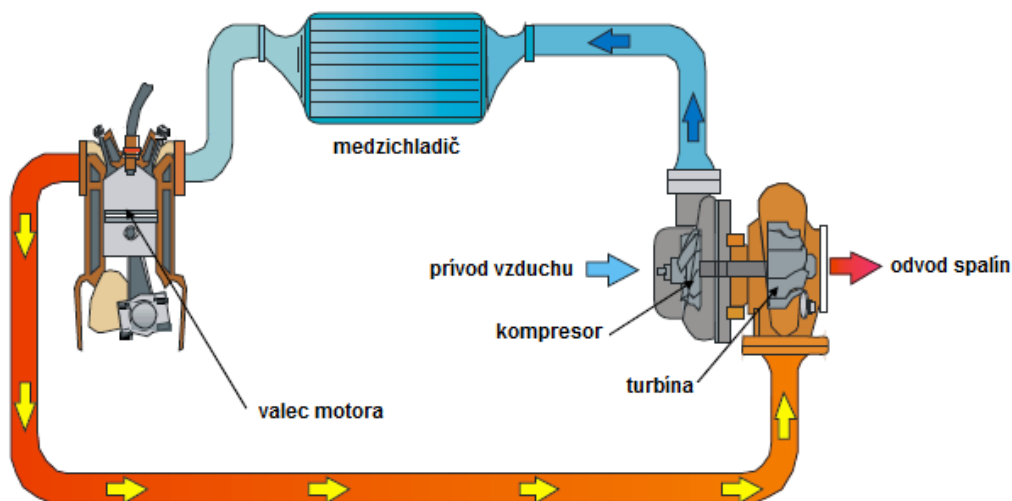
Pri preplňovaných motoroch sú valce plnené tlakom vyšším ako je atmosférický. Vďaka preplňovaniu sa do pracovného priestoru dostáva väčšie množstvo vzduchu, a tak je možné zväčšiť aj množstvo paliva dodávaného na jeden pracovný obeh. Preplňovaním preto možno buď zvýšiť výkon motora, alebo pri rovnakom výkone zmenšiť jeho rozmery. [6]

Dnešné preplňované motory využívajú potenciál turbodúchadla pre znižovanie spotreby paliva (tzv. downsizing – zmenšovanie objemu motora, pri zachovaní výkonu vďaka turbodúchadlu a súčasné zníženie spotreby) a s tým súvisiace obmedzenie emisií. [16]

Preplňovanie tiež ponúka riešenie jednej zásadnej nevýhody spaľovacieho motoru, ktorou sú nízke hodnoty krútiaceho momentu pri nízkych otáčkach motora. Aby bola táto nevýhoda odstránená alebo obmedzená, umiestňuje sa najvyšší účinok preplňovania spravidla do nízkych otáčok.

1.2 PRINCÍP ČINNOSTI TURBODÚCHADLA

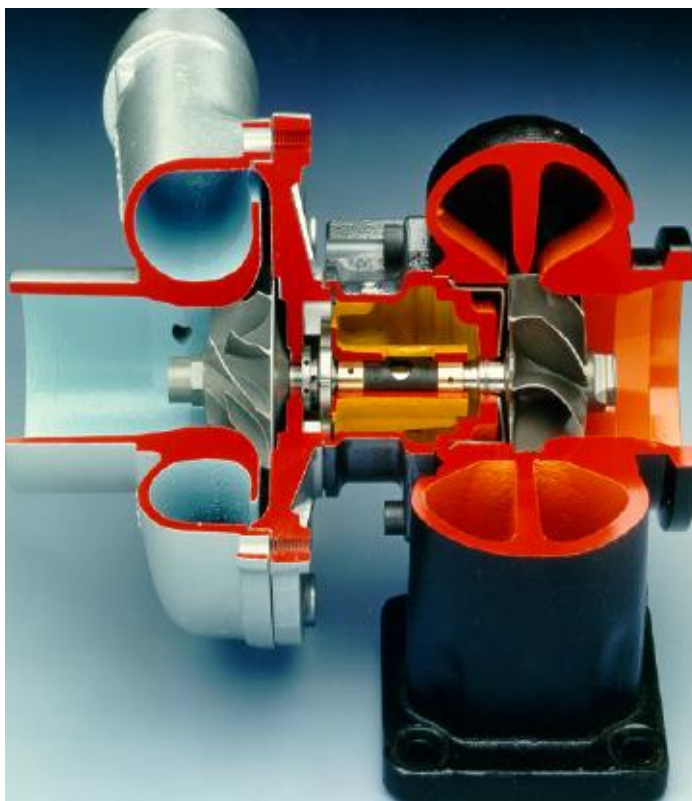
Základný princíp fungovania turbodúchadla je znázornený na obr. 1.1. Po spaľovacom procese vo valcoch motora prechádzajú spaliny výfukovými ventilmi do výfukového potrubia, ktoré vedie energiu výfukových plynov vo forme tepla a tlaku do turbínovej časti turbodúchadla. Výfukové plyny expandujú a roztáčajú turbínové kolo, ktoré poháňa kompresorové kolo umiestnené na spoločnom hriadeľi. Po prechode cez vzduchový filter smeruje nasávaný vzduch na vstup kompresoru turbodúchadla. Vzduch je potom stlačený kompresorom, čím sa zvýši jeho hustota. Väčšina dnešných turbo systémov využíva medzichladič, ktorý odstraňuje prebytočné teplo, čo umožňuje ďalšie zvýšenie hustoty, pri súčasnom chladení nasávaného vzduchu. Potrubím je potom vzduch vedený z výstupnej strany chladiča na sacie potrubie motora, kde je vzduch nasmerovaný k sacím ventilom. Vďaka zvýšenej hustote vstupuje do valca väčšie množstvo vzduchu ako v prípade atmosféricky plneného motora, čo umožňuje aj väčšie množstvo vstreknutého paliva. Výsledkom je vyšší výkon a krútiaci moment motora. [5]



Obr. 1.1 Princíp činnosti turbodúchadla [7]

1.3 KONŠTRUKCIA TURBODÚCHADLA

Konštrukcia turbodúchadla sa líši v závislosti na výrobcovi či aplikácii, ale základná podstata zostáva rovnaká. Všetky turbodúchadlá sa skladajú z troch hlavných častí: kompresorová (sacia časť), ktorá slúži k nasávaní čerstvého vzduchu, stlačeniu a jeho dodávke do spaľovacieho priestoru; ložisková časť, ktorá zabezpečuje uloženie, chladenie a mazanie rotačnej skupiny; a turbínová (výfuková časť), ktorá zaisťuje pohon turbodúchada.



Obr. 1.2 Konštrukcia turbodúchadla [7]

1.3.1 TURBÍNOVÁ ČASŤ

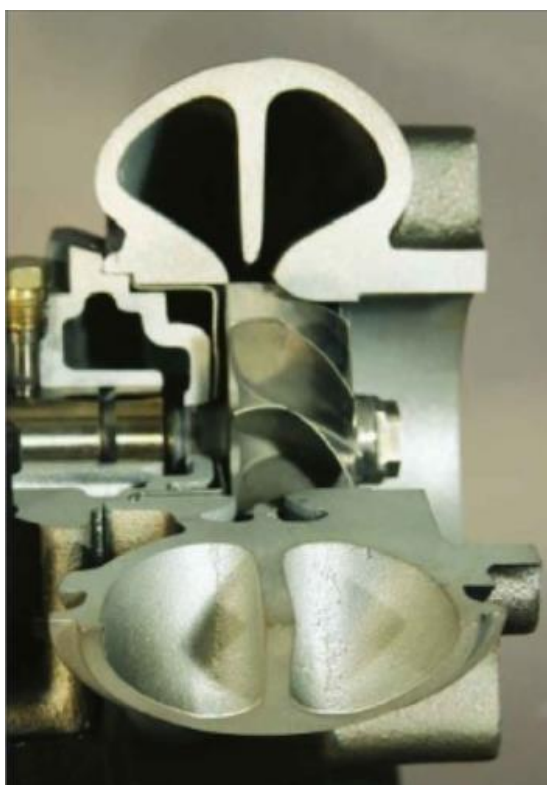
Turbínovú časť tvorí turbínové kolo a turbínová skriňa. Turbínové kolo sa najčastejšie vyrába zo žiaruvzdornej niklovej zliatiny, ktorá odoláva aj extrémnym teplotám výfukových plynov zažihových motorov. Vyrába sa presným odlieváním a s hriadeľom z ušľachtilej ocele je spravidla spojené pomocou trecieho zvarovania. [6]

Turbínová skriňa sa vyrába ako odliatok zo šedej zliatiny a dáva priestor pre optimálnu reguláciu plniaceho tlaku. Jej tvar a veľkosť výrazne ovplyvňujú rýchlosť a prietok prúdiacich výfukových plynov. Pri jej návrhu je preto dôležitý A/R pomer, ktorý je definovaný ako pomer medzi plochou prietochného prierezu turbíny a vzdialenosťou od stredu tejto plochy k ose rotácie zostavy. Použitím menšieho A/R sa zvýši rýchlosť výfukových plynov poháňajúcich turbínové kolo. Tým sa dosiahne zvýšený výkon turbíny pri nízkych otáčkach motoru, čo má za následok rýchlejší nárast tlaku. Avšak malé A/R má tendenciu zvyšovať protitlak výfukových plynov, čo nepriaznivo ovplyvňuje výkon pri vysokých otáčkach motoru. Naopak, použitie väčšieho A/R zníži rýchlosť výfukových plynov a spomaľuje nárast tlaku. Výfukové plyny ale vstupujú na koleso radiálne a to znamená nižší protitlak. Výsledkom je vyšší výkon vo vysokých otáčkach. [18]

Design turbínovej skrine ovplyvňuje aj skutočnosť, že energia výfukových plynov privádzaných na turbínu neprichádza vo forme konštantného prúdu, ale v podobe pulzov. Napríklad u štvorvalcového motoru prichádzajú pulzy s každým otočením kľukového hriadeľa o 180°, u osemvalcového každých 90°. Pri klasickom riešení s jednoduchým kanálom turbíny teda dochádza k istej interferencii medzi výfukovými plynmi z jednotlivých valcov.

Výsledkom je nižší tlak, čo znižuje účinnosť celého zariadenia. Jedným z riešení je použitie turbínovej skrine radiálne rozdelenej na dve komory. Prúdy výfukových plynov z jednej polovice valcov vstupujú do jednej komory turbíny a spaliny z druhej polovice valcov prúdia do druhej komory. V tomto prípade každá komora poháňa len jednu polovicu obvodu turbínového kola. [2][3]

Modernejším typom rozdelenej turbínovej skrine je axiálne rozdelená skriňa twin-scroll (obr. 1.3). Toto riešenie umožňuje výfukovým plynom z každej komory prístup na celý obvod turbínového kola. Tento design je relatívne účinný v predchádzaní spätného chodu plynu pri nízkom tlaku v komore turbíny. Toto riešenie je preto výhodné hlavne pre motory, kde je požadovaný vysoký krútiaci moment pri malých otáčkach. [2]



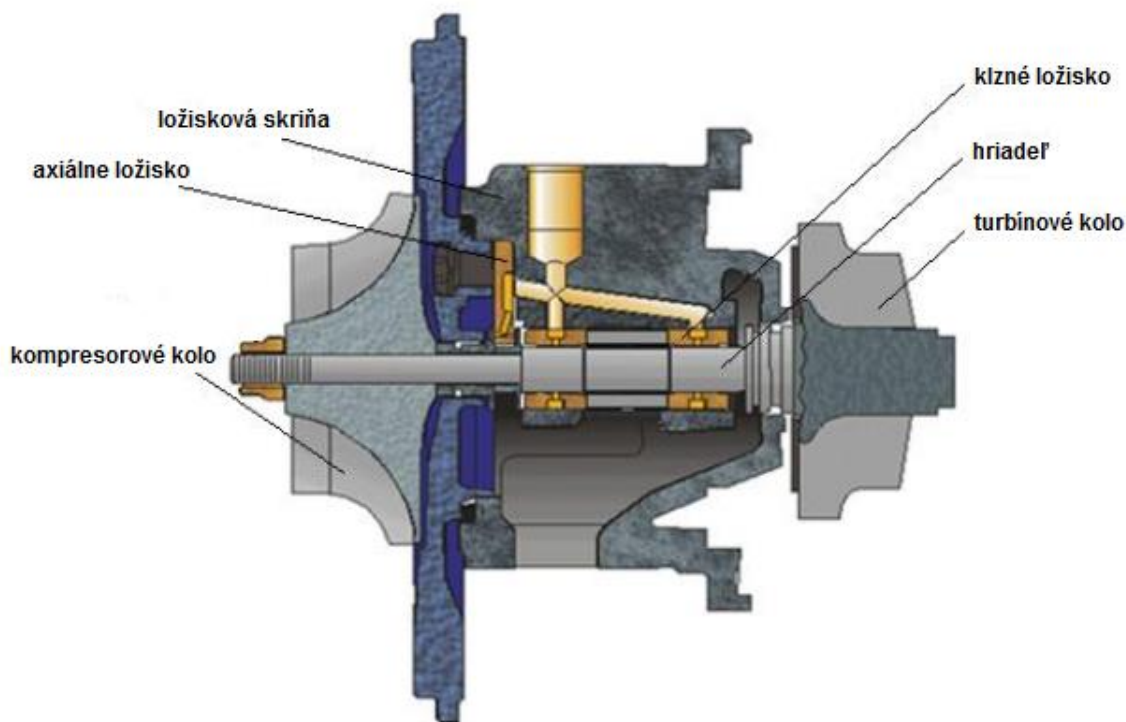
Obr. 1.3 Rez turbínovou skriňou twin-scroll [5]

1.3.2 LOŽISKOVÁ ČASŤ

Uloženie rotoru musí byť konštruované s ohľadom na jeho vysoké prevádzkové nároky. Musí vydržať vysoké otáčky (podľa zaťaženia motoru sa rozsah otáčok pohybuje v rozmedzí 50 000 až 180 000 min^{-1}). Takisto musí odolávať radiálnemu a axiálnemu zaťaženiu a vysokým teplotám. [5]

V prevažnej väčšine turbodúchadiel sa používa hydrodynamický ložiskový systém s dvoma plávajúcimi klznými ložiskami a jedným axiálnym. Tento ložiskový systém je zobrazený na obrázku 1.4. Klzné ložiská rotujú v otvoroch olejom mazanej centrálnej ložiskovej skrine v rovnakom smere a približne polovičnou rýchlosťou ako hriadeľ. Týmto spôsobom sa zníži relatívna rýchlosť medzi hriadeľom a klznými ložiskami, vďaka čomu sa znižujú trecie straty a

opotrebenie. Druhou možnosťou je použitie jednodielneho polo-plávajúceho ložiska, ktoré nerotuje a hydrodynamická vrstva sa nachádza len medzi ložiskom a hriadeľom. Posuvu v axiálnom smere zabraňuje axiálne ložisko, pričom môže byť samostatné alebo môže tvoriť súčasť jednodielneho ložiska. Mazanie ložísk je zabezpečené napojením na tlakový mazací systém motoru. [6][19]



Obr. 1.4 ložiskový systém turbodúchadla [7]

V dnešnej dobe sa stále viac začínajú miesto klzných ložísk používať guľčkové. Guľčkové ložiská kombinujú funkciu radiálneho a axiálneho ložiska. Ich veľkou výhodou sú nižšie trecie straty v ložiskovom systéme, výrazne znížená spotreba oleja a vyššia účinnosť. V ich neprospech hovorí vyššia cena. [19]

1.3.3 KOMPRESOROVÁ ČASŤ

Kompresor sa skladá z dvoch základných častí, kompresorového kola a kompresorovej skrine. Obidve časti sa vyrábajú z hliníkovej zliatiny. Kompresor má dve hlavné funkcie. Prvou je zvýšiť sací tlak, pretože vyšší tlak umožňuje účinnejšie plnenie valcov motora. Ďalšou funkciou je zvýšenie hustoty vzduchu. Motor má pevne stanovený zdvihový objem a vďaka zvýšenému tlaku a hustote prúdi do motora väčšie množstvo vzduchu, vďaka čomu môže byť do motora dodané a spálené väčšie množstvo paliva. [5]

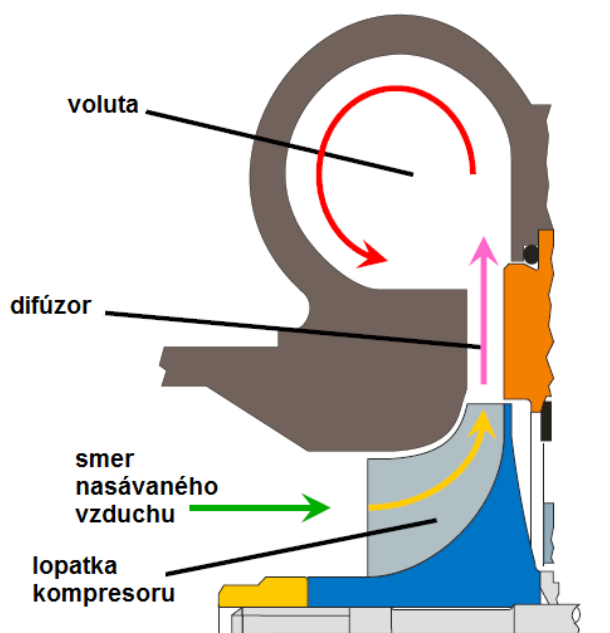
Kompresorové kolo (obr. 1.5) je radiálny kompresor, čo znamená, že vzduch vstupuje na nábežnej hrane kola nazývanej inducer, kolo vzduch urýchľuje a otáča o 90 stupňov. Vzduch následne opúšťa kompresorové kolo v smere kolmom na hriadeľ turbíny, ktorý poháňa

kompresorové kolo. Energia získaná z turbíny je využívaná na poháňanie kompresorového kola, ktoré nasáva vzduch z okolia a následne ho stláča. [5]



Obr. 1.5 Kompresorové kolo [7]

Po tom, ako vzduch opustí kompresorové kolo, vstupuje do časti kompresorovej skrine, ktorá sa nazýva difúzor. V difúzore sa premieňa kinetická energia vzduchu na tlakovú. Stlačený vzduch opúšťa kompresorovú skriňu a plniacim potrubím je vedený priamo do motora, alebo do chladiča a z neho do motora. [5]



Obr. 1.6 Princíp činnosti kompresoru [7]

2 REGULÁCIA PLNIAČEHO TLAKU TURBODÚCHADLA

Otáčky turbodúchadla, na ktorých závisí množstvo a tlak plniaceho vzduchu, sa regulujú samovoľne podľa množstva a tlaku spalín, teda v závislosti na zaťažení motoru. Pokiaľ je použité veľké turbínové kolo, pri zvyšovaní otáčok motoru bude plniaci tlak plynule narastať a s blížiacimi sa maximálnymi otáčkami motoru bude tlak rásť značne pomalším tempom, kým sa nedosiahne vopred určené bezpečné maximum plniaceho tlaku zároveň s maximálnymi otáčkami motoru. Ak bude použitá malá turbína, nárast plniaceho tlaku začne približne pri rovnakých otáčkach motoru, ale jeho nárast bude prudší a dosiahne sa oveľa vyššieho tlaku vďaka ľahšiemu a menšiemu turbínovému kolu, ktoré je schopné dosiahnuť vyššiu rýchlosť otáčania a v kratšom čase. To má za následok, že pri vysokých otáčkach motoru a veľkom množstve výfukových plynov je tlak turbodúchadla v nepripustných hodnotách. Aby nedošlo k poškodeniu motoru a samotného turbodúchadla v dôsledku príliš vysokých otáčok a prehrievania, je nutné plniaci tlak regulovať. [2][6]

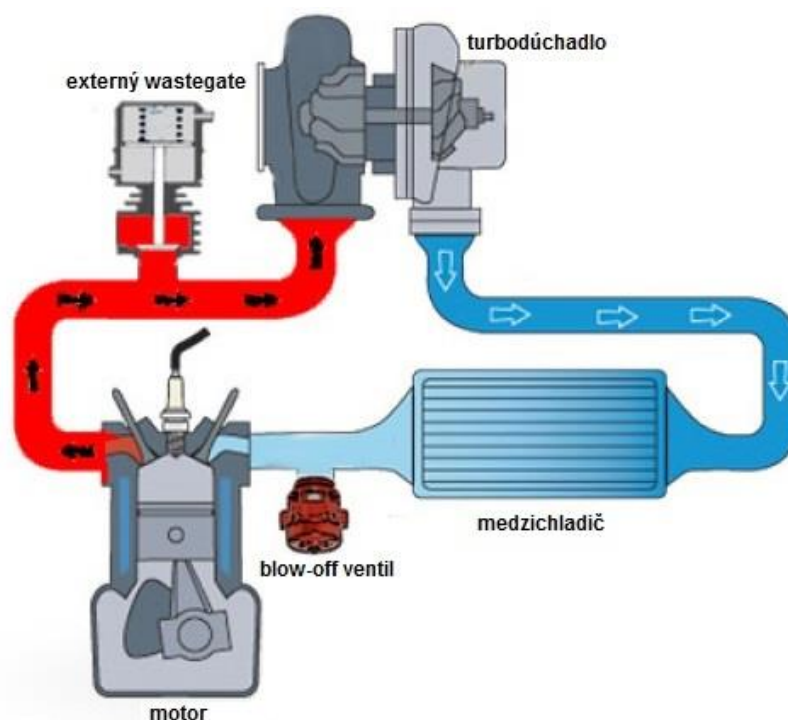
2.1 WASTEGATE

Jedným zo spôsobov regulácie plniaceho tlaku turbodúchadla je regulácia turbodúchadla pomocou obtokového regulačného ventilu, tzv. wastegate. V tomto prípade je turbodúchadlo navrhnuté tak, aby dodávalo pomerne veľké množstvo vzduchu už pri nízkych otáčkach motoru. Po dosiahnutí určitého tlaku v plniacom potrubí sa otvorí obtokový regulačný ventil a časť výfukových plynov je vedená obtokovým potrubím mimo turbínu priamo do tlmiča výfuku. [1]

Bez obtokového ventilu regulujúceho množstvo energie výfukových plynov prichádzajúceho do turbínovej skrine, by otáčky malého turbínového kola prekročili bezpečnú maximálnu rýchlosť a prebytočná energia nemôže byť efektívne využitá. Ak je však časť výfukových plynov po dosiahnutí požadovaného plniaceho tlaku odvedená mimo turbínu, malé turbínové kolo vytvorí užitočný plniaci tlak oveľa skôr ako veľké turbínové kolo. Preto, ako náhle sa dosiahne požadovaný plniaci tlak, obtokový ventil sa otvorí a obtokové potrubie odkloní dostatočné množstvo výfukového plynu z turbínovej skrine tak, aby plniaci tlak zostal pomerne konštantný v celom hornom rozsahu otáčok motora. [2]

2.1.1 EXTERNÝ WASTEGATE

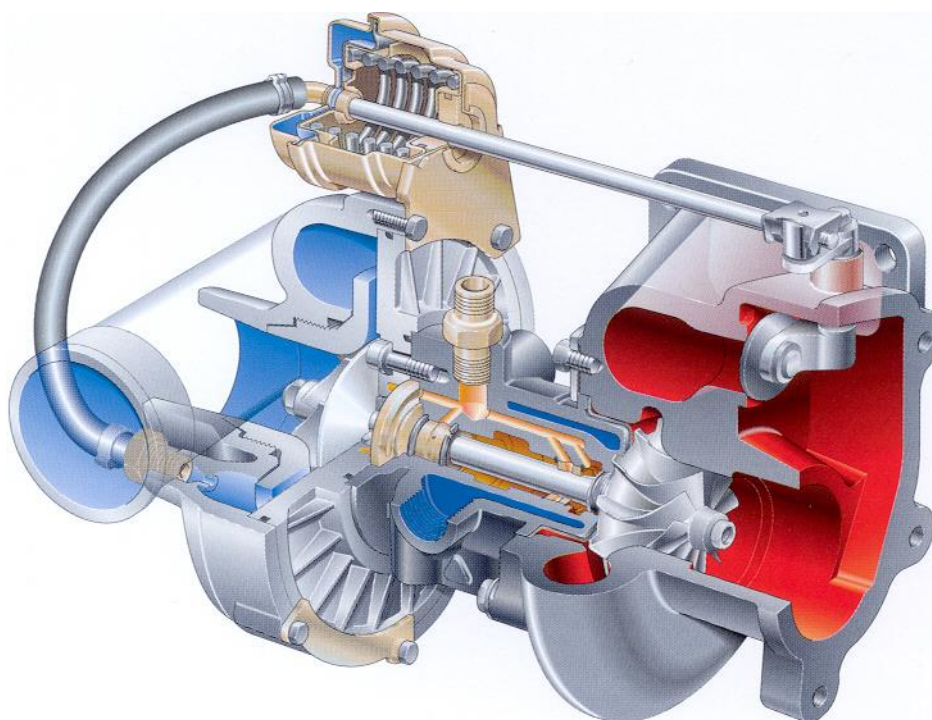
Externý wastegate (obr. 2.1) je samostatný mechanizmus, ktorý sa zvyčajne používa s turbodúchadlami, ktoré nemajú zabudovaný svoj vlastný obtokový ventil a vyžaduje špeciálne obtokové potrubie. Externý wastegate sa zvyčajne využíva v aplikáciach s vysokým výkonom pre presnejšiu reguláciu plniaceho tlaku. [7]



Obr. 2.1 Externý wastegate [13]

2.1.2 INTERNÝ WASTEGATE

Interný wastegate (obr. 2.2) je obtokový ventil vstavaný v turbínovej skrini turbodúchadla, ktorý umožňuje odkloniť prebytočné výfukové plyny mimo turbínu priamo do výfukového systému motoru. Ovládanie interného obtokového ventilu tlakovým signálom zo sacieho potrubia je obdobné ako u externého wastegatu. Výhodou je jednoduchšia a kompaktniešia inštalácia bez obtokového potrubia. Okrem toho je všetok prebytočný výfukový plyn automaticky vedený späť do katalyzátoru a výfukového systému. Nevýhody v porovnaní s externým wastegatom zahŕňujú obmedzenú schopnosť vypúšťať tlak výfukových plynov kvôli relatívne malému priemeru interného obtokového ventilu. [7]



Obr. 2.2 Turbodúchadlo s interným obtokovým ventilom Wastegate [16]

2.2 VNT

Turbodmúchadlo s variabilnou geometriou lopatiek statoru turbíny, ktorému náleží skratka VNT (Variable Nozzle Turbine), predstavuje spôsob aktívnej regulácie plniaceho tlaku pomocou nastaviteľných rozvádzačích lopatiek v turbíne, ktoré riadia prúd výfukových plynov privádzaný na turbínové kolo.

2.2.1 KONŠTRUKCIA VNT

Na rozdiel od turbodúchadla s obtokovým ventilom sa nereguluje plniaci tlak len v hornom rozsahu otáčok, ale v celom rozsahu pracovných otáčok motoru. Veľkosť prierezu, ktorým prúdia výfukové plyny do turbíny, a smer prúdu je ovplyvňovaný nastaviteľnými rozvádzačimi lopatkami, ktoré sú rozmiestnené na otočnom rozvádzačom kole. Turbínou prúdi stále celý objem výfukových plynov produkovaných motorom (žiadny obtok). Pneumatický valec pohybuje pomocou ovládacieho mechanizmu rozvádzačím kolom, ktoré nastavuje polohu rozvádzačích lopatiek. [6][8]

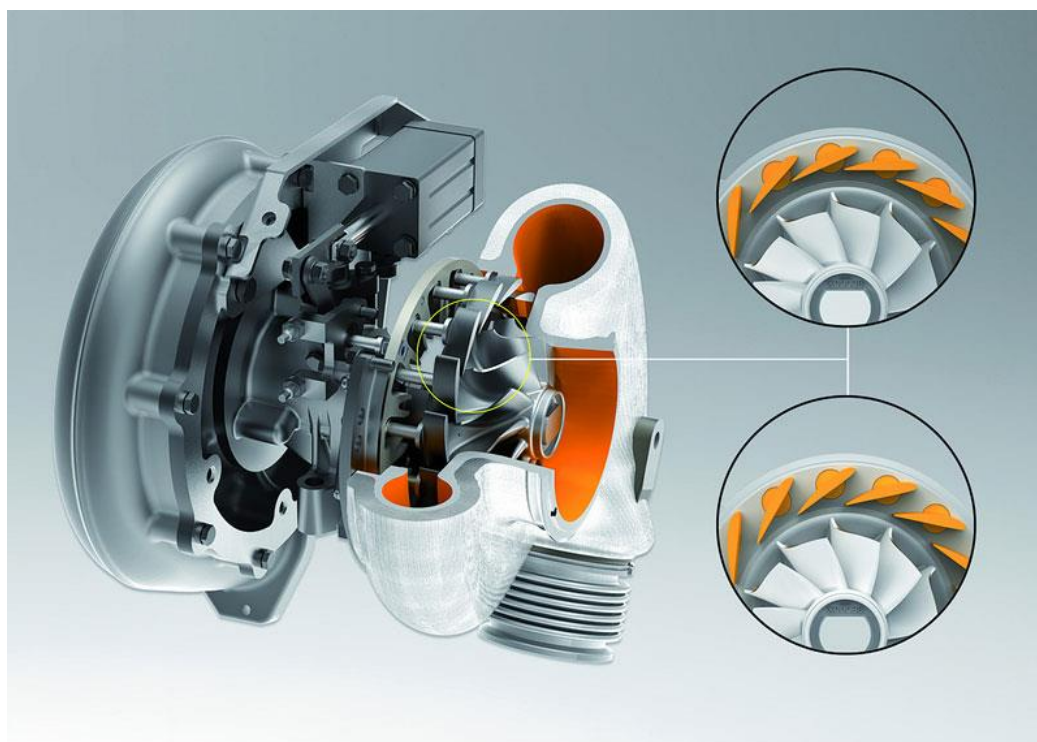
Hriadele rozvádzačích lopatiek prechádzajúce nosným krúžkom sú na konci opatrené vodiacim čapom. Vodiaci čap je spojený s rozvádzačím kolom. Všetky rozvádzačie lopatky tak môžu byť rovnomerne a súčasne nastavované pomocou rozvádzačieho kola. Rozvádzačím kolom pohybuje čap ovládacieho mechanizmu, ktorý je spojený s podtlakovým ovládacím valcom. [6]

2.2.2 PRINCÍP REGULÁCIE PLNIACEHO TLAKU POMOCOU VNT

V prípade regulácie plniaceho tlaku pomocou premennej geometrie rozvážacích lopatiek turbíny sa využíva skutočnosť, že konštantný objem plynu prúdi potrubím tým rýchlejšie, čím má potrubie menší prierez (rovnica kontinuity).

Keď motor beží v nízkych otáčkach, je požadovaný dostatočný plniaci tlak. Pomocou nastaviteľných rozvážacích lopatiek sa zmenší prierez, ktorým prúdia výfukové plyny na lopatky turbíny. Výfukové plyny prúdia zúženým miestom rýchlejšie a zároveň sú usmernené tak, aby na turbínové koleso prichádzali tangenciálne a to na koniec lopatiek. Vďaka tomu výfukové plyny roztáčajú turbínové kolo do vyšších otáčok. Vďaka vysokým otáčkam turbíny sa aj pri nízkych otáčkach motoru dosiahne potrebný plniaci tlak. Výsledkom je pomerne vysoký krútiaci moment v dolnom rozsahu otáčok. [6]

Keď motor beží vo vysokých otáčkach, maximálny dovolený plniaci tlak nesmie byť prekročený. Rozvážacie lopatky sa nastavujú tak, že sa vstupný prierez zväčší natoľko, aby prúd výfukových plynov otáčal turbínovým kolom rýchlosťou potrebnou pre zachovanie výkonu turbodúchadla, a pritom nebol prekročený maximálny dovolený plniaci tlak. [6]



Obr. 2.3 Spôsob regulácie plniaceho tlaku pomocou VNT [11]

2.2.3 VNT V ZÁŽIHOVÝCH MOTOROCH

Problémom širšieho využitia systému VNT je obmedzenie v podobe maximálnej teploty prechádzajúcich výfukových plynov. Preto je systém VNT v súčasnosti využívaný hlavne pri dieselových motoroch, z dôvodu podstatne nižšej teploty prúdiacich výfukových plynov (približne do 850 °C).

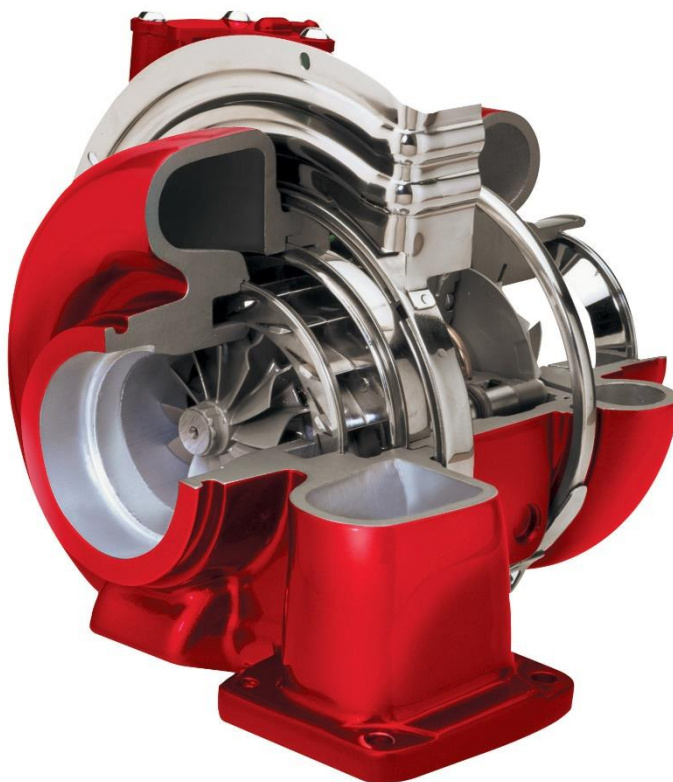
V prípade benzínových motorov sa variabilná geometria turbíny z dôvodu vysokých teplôt výfukových plynov (až do 1000 °C) bežne nevyužíva, a tak plniaci tlak je zväčša regulovaný pomocou obtokového ventilu. Vývoj však pokročil a tak sa aj v prípade benzínových motorov objavujú turbodúchadlá využívajúce systém VNT. K zvládnutiu vysokých teplôt výfukových spalín pomáha použitie špeciálnych materiálov využívaných napríklad v kozmickom priemysle. Nevýhodou použitia takýchto materiálov je ich vysoká cena, ktorá by v prípade bežných vozidiel znamenala výrazné navýšenie ceny celého vozidla. Vo veľkosériovej výrobe sa turbodúchadlo s premennou geometriou lopatiek turbíny v benzínovom motore objavilo predstavením motora 1,5 TSi koncernom VW. Okrem pokroku v materiálovom inžinierstve pomohla nasadeniu turbodúchadla s VNT aj úprava spaľovacieho cyklu. Tento motor pracuje v Millerovom cykle, vďaka čomu sa teplotu výfukových plynov podarilo znížiť na cca 880 °C, čo je len mierne viac ako v prípade dieslových motorov. [15]

2.3 VGT

Turbodúchadlo s premennou šírkou satoru turbíny (obr. 2.4) je technológia patentovaná firmou HOLSET pod označením VGT. Pracuje na podobnom princípe regulácie ako turbodúchadlo s premennou geometriou rozvádzacích lopatiek turbíny. Podstatným rozdielom je, že VGT mechanizmus pozostáva z axiálne posuvného rozvádzacieho kola spojeného s kompresorom, pričom rozvádzacie lopatky, umiestnené tiež po obvode, sú s rozvádzacím kolom spojené pevne (neotočne). [9]

Celé rozvádzacie kolo sa axiálne posúva v priestore turbíny, a tým sa súčasne lopatky zasúvajú do prstenca v protiľahlej stene, v ktorej sú otvory v tvare lopatiek. Zmenou šírky satoru turbíny sa mení vstupná rýchlosť výfukových plynov na obežné kolo turbíny. Na ovládanie tohto axiálneho posuvu sa používa piest, ktorý sa pohybuje vplyvom tlaku vzduchu z brzdového systému automobilu. Snímanie tlaku plniaceho vzduchu je realizované bezdotykovým snímaním otáčok turbodúchadla magnetickým snímačom, ktorý je umiestnený v ložiskovej skrini uprostred rotoru. [12]

Výhodou VGT je, že turbínou prechádza celý hmotnostný tok výfukových plynov, a tým je možné využiť čo najviac energie. Nepohyblivé rozvádzacie lopatky sú nastavené tak, aby vytvárali ideálny uhol nábehu výfukového plynu na lopatky obežného kola turbíny, a tým zvyšujú priemernú účinnosť turbíny v celom pracovnom rozsahu. [12]



Obr. 2.4 Cummins turbodúchadlo s VGT technológiou [10]

2.4 OVLÁDACIE PRVKY REGULAČNÝCH SYSTÉMOV

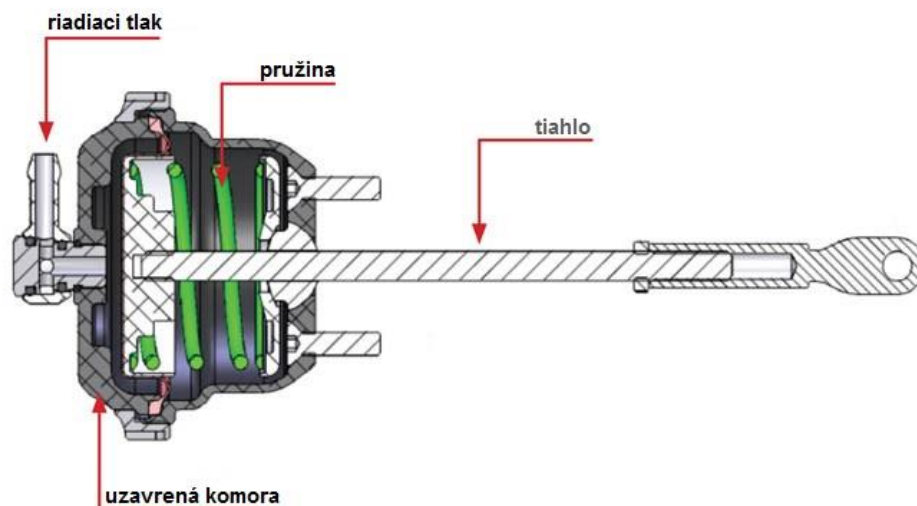
Na ovládanie regulačných systémov turbodúchadla sa používajú aktuátory, ktoré umožňujú reguláciu polohy daného mechanizmu. Najčastejšie sa využívajú pretlakové a podtlakové aktuátory alebo modernejšie elektrické aktuátory.

2.4.1 PNEUMATICKÝ AKTUÁTOR

Najjednoduchším ovládacím prvkom pre reguláciu sú pneumatické aktuátory, ktoré predstavujú jednoduchý kinematický mechanizmus riadený pretlakom alebo podtlakom. Aktuátor sníma zvýšenie tlaku a po dosiahnutí vopred stanoveného tlaku otvára obtokový ventil alebo pohybuje rozvádzačím kolom, ktoré pri otáčavom vratnom pohybe mení nasmerovanie lopatiek. Tlak vzduchu sa zvyčajne zaznamenáva buď zo vstupného potrubia, alebo z kompresorovej skrine turbodúchadla. Pneumatické ovládanie regulácie je výhodné hlavne kvôli svojej jednoduchosti a nízkej cene.

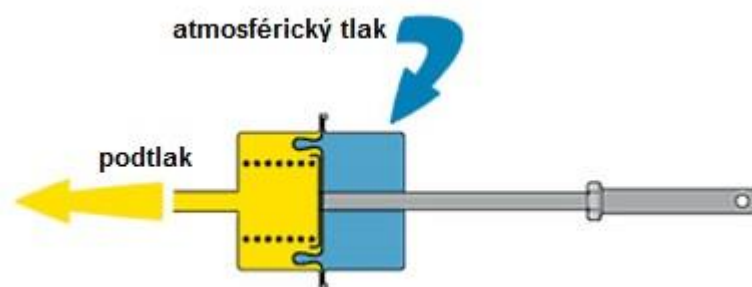
Pretlakový aktuátor (obr. 2.5) sa najčastejšie používa na ovládanie obtokového ventilu turbodúchadla. Skladá sa z utesnenej komory, v ktorej sa nachádza pružina s membránou. Pri stúpaní tlaku stláčaného turbodúchadlom, sa zvyšuje tlak v uzavretej komore aktuátora, ktorý pôsobí na pružinu. Keď je tlak dostatočne vysoký na to, aby prekonal silu pružiny, pružina sa stlačí a vysunie sa tiahlo pripojené na mechanizmus obtokového ventilu, ktorý sa začne otvárať

a výfukové plyny sú odvádzané z turbíny. Keď tlak klesá, pružina sa uvoľňuje a tiahlo sa vracia do pôvodnej polohy pričom zatvára obtokový ventil. [14]



Obr. 2.5 Pretlakový pneumatický aktuátor [14]

Podtlakový aktuátor (obr. 2.6) pracuje na podobnom princípe ako pretlakový. Skladá sa z dvoch komôr oddelených membránou, pričom jedna komora je vákuová a na spodnej strane membrány pôsobí atmosférický tlak. Keď je požadované zvýšenie plniaceho tlaku, vzniká vo vákuovej komore podtlak a atmosférický tlak na spodnej strane membrány prekonáva silu pružiny, ktorá vtáhuje tiahlo dovnútra. V podtlakovom aktuátore je vďaka nízkym tlakom možné použiť slabšiu pružinu. Nevýhodou tohto typu je, že je náchylnejší na netesnosti. [21]



Obr. 2.6 Podtlakový pneumatický aktuátor [21]

2.4.2 REA/SREA

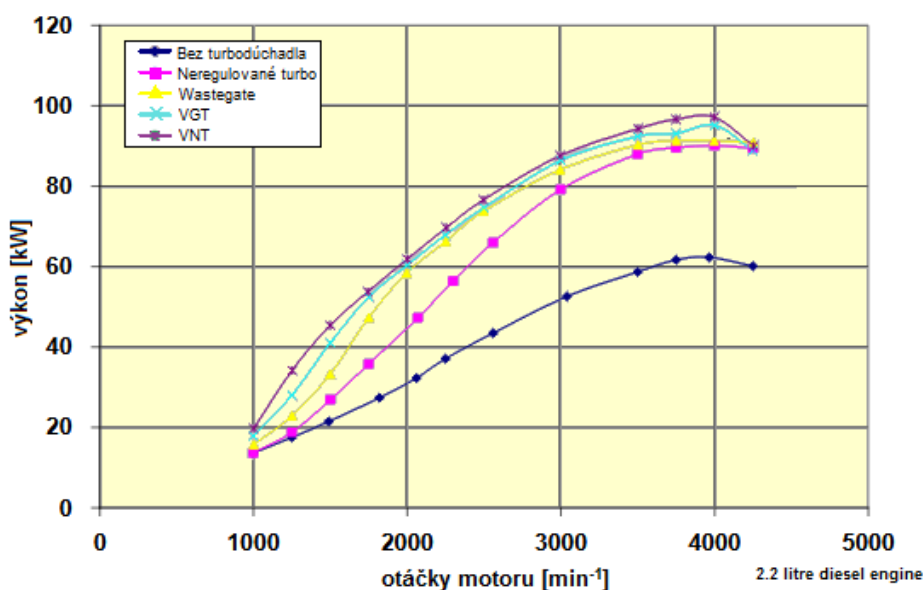
Aktuátory REA (elektronicky riadený aktuátor s rotačným mechanizmom) a SREA (elektronicky riadený aktuátor s rotačným mechanizmom a spätnoväzbovým riadením) sú elektromechanické zariadenia namontované na skrini kompresoru a pripojené k VNT mechanizmu alebo obtokovému ventilu. Zavedenie elektronicky riadeného vstrekovania paliva

v dieselových motoroch vyvolalo aj potrebu elektronicky riadeného prietoku vzduchu. V spojení s VNT turbodúchadlami, zabezpečuje elektronicky riadený aktuátor riadenie toku vzduchu v ustálenom aj prechodnom režime tým, že pozná a riadi presnú polohu lopatiek. S jednotkou na riadenie motora komunikuje buď analógovo, pomocou signalizácie PWM (Pulse – Width – Modulation) alebo pomocou dátovej zbernice CAN (Controller Area Network), vďaka čomu prijíma a vykonáva pokyny okamžite. [17]

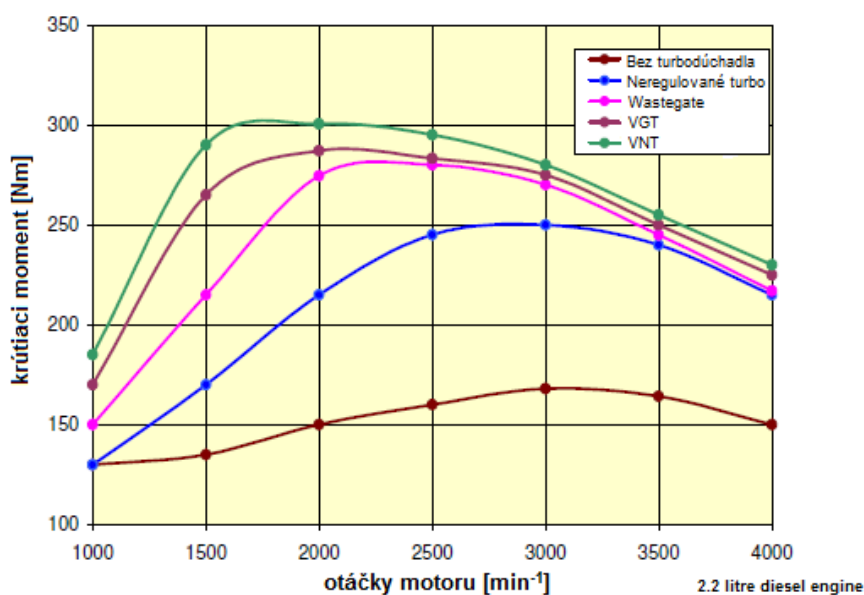
Elektrické aktuátory majú odozvu približne 150 ms, čo je viac než trikrát rýchlejšia odozva ako v prípade pneumatického aktuátoru. Vďaka okamžitému snímaniu polohy, poskytujú elektrické aktuátory presnejšiu a efektívnejšiu reguláciu turbodúchadiel. Rýchla odozva a vysoká presnosť ovládania elektrických aktuátorov pomáhajú zlepšiť výkon motoru, zvýšiť účinnosť paliva a znížiť emisie. Hlavnou nevýhodou elektronického aktuátoru je podstatne vyššia cena v porovnaní s jednoduchým pneumatickým aktuátorom. [17]

2.5 POROVNANIE REGULAČNÝCH SYSTÉMOV

Na grafoch 2.1 a 2.2 sú porovnané výkonnostné charakteristiky a charakteristiky krútiaceho momentu pre dieselový motor s objemom 2,2 litra bez turbodúchadla, s neregulovaným turbodúchadlom a s rôznymi spôsobmi regulácie turbodúchadla. Môžeme vidieť, že všetky spôsoby regulácie priaznivo ovplyvňujú výkonnostnú charakteristiku motora a je zrejma predovšetkým značná výhoda regulácie pomocou VNT oproti ostatným spôsobom regulácie. Regulácia pomocou VNT dosahuje vyšší výkon a krútiaci moment v celom rozsahu otáčok motoru a posúva hodnotu maximálneho krútiaceho momentu do nižších otáčok. Navyše VNT disponuje rýchlejšou odozvou pri akcelerácií, výrazne obmedzuje turboefekt a efektívne znižuje spotrebu paliva a emisií.



Graf 2.1 Porovnanie výkonovej charakteristiky pre rôzne spôsoby regulácie [7]



Graf 2.2 Porovnanie krútiaceho momentu pre rôzne spôsoby regulácie [7]

Nevýhodou mechanizmu VNT je náchylnosť k teplotnej korózii a zadieraniu, komplikovanejšia konštrukcia a s tým súvisiaca vyššia cena v porovnaní s použitím obtokového regulačného ventilu wastegate. Najväčšie obmedzenie tohto spôsobu regulácie je však jeho využitie v zážihových motoroch, kde sa mu zatiaľ nepodarilo presadiť vo väčšom rozsahu kvôli náchylnosti pohyblivých častí na vysoké teploty spalín zážihových motorov, vyžadujúcich použitie drahých pokročilých materiálov, prípadne úpravu spaľovacieho cyklu ako bolo spomínané v časti 2.2.3.

Turbodúchadlo s premennou šírkou statoru turbíny eliminuje niektoré nedostatky VNT turbodúchadiel. Vďaka pevnému uloženiu rozvádzacích lopatiek na rozvádzacom kole, má tento design menej pohyblivých častí a je preto menej náchylný k zadieraniu a teplotnému poškodeniu. Jednoduchšia konštrukcia v porovnaní s VNT zlepšuje životnosť a spoľahlivosť a priaznivo ovplyvňuje cenu.

Napriek tomu, že systém wastegate disponuje slabšou výkonnostnou charakteristikou a krútiacim momentom v porovnaní s VNT a VGT mechanizmom a plniaci tlak je regulovaný len v hornom rozsahu otáčok, stále patrí medzi najpoužívanéjšie spôsoby regulácie. Jeho veľkou výhodou je najjednoduchšia konštrukcia a nízka cena, ako aj univerzálne využitie v dieselových aj benzínových aplikáciách, vďaka čomu má na trhu stále silné zastúpenie.

2.6 TRENDY A VÝVOJ REGULAČNÝCH SYSTÉMOV V BUDÚCNOSTI

Do budúcnosti môžeme predpokladať, že turbodúchadlá s variabilnou geometriou budú postupne nahrádzať pevnú geometriu a to predovšetkým v dieselových aplikáciách. Veľkou výzvou do budúcnosti je zavedenie turbodúchadiel s variabilnou geometriou v zážihových motoroch pre veľkosériovú výrobu. Zmenu môže priniesť najmä pokrok v materiálovom inžinierstve nakoľko tomuto kroku zatiaľ stojí v ceste hlavne vysoká cena potrebných materiálov.

Smer ďalšieho vývoja naznačuje aj predstavenie systému VNT DualBoost firmou Honeywell. Tento systém využíva obojstranné kompresorové kolo, ktoré nahrádza veľké kompresorové kolo alebo viacstupňový systém preplňovania. Okrem toho spája dva systémy regulácie a to VNT a obtokový ventil wastegate. [20]

Jedným z najnovších trendov v oblasti preplňovania, ktorý má tiež veľký potenciál hlavne pre hybridné vozidlá, je využitie elektrifikácie turbodúchadla. Princíp tejto technológie spočíva v použití elektrického motoru uloženého na hriadeli medzi kompresorom a turbínou. V nízkych otáčkach tento motor pomáha poháňať hriadeľ turbodúchadla a vo vysokých otáčkach pri prebytku plniaceho tlaku sa motor prepne do generátorického režimu a ukladá vytvorenú elektrickú energiu.

ZÁVER

Prvá časť tejto práce bola venovaná problematike preplňovania spaľovacieho motoru pomocou turbodúchadla, ktoré je najrozšírenejším spôsobom preplňovania. Turbodúchadlá hrajú dôležitú úlohu v trende znižovania objemu motorov s cieľom splniť stále prísnejšie predpisy týkajúce sa vypúšťania emisií do ovzdušia a dosiahnuť čo najmenšiu spotrebu paliva.

Pre čo najlepšie využitie potenciálu turbodúchadla je potrebné, aby dodávalo do motoru dostatočný plniaci tlak v celom rozsahu otáčok motora a zároveň neprekročilo jeho maximálnu bezpečnú hodnotu. To je možné dosiahnuť pomocou regulačných systémov, ktorým bola venovaná druhá časť tejto práce. Najčastejšie využívanými spôsobmi regulácie plniaceho tlaku je regulácia pomocou obtokového ventilu wastegate a pomocou modernejšej VNT technológie s variabilnou geometriou lopatiek statoru turbíny. Napriek značným výhodám VNT technológie (vysoký výkon, krútiaci moment, rýchla odozva), má aj svoje nedostatky v podobe zložitej konštrukcie, nižšej životnosti a predovšetkým náchylnosti na vysoké teploty výfukových plynov v zážihových motoroch. Alternatívou sú turbodúchadlá s premennou šírkou statoru turbíny, ktorých výhodou je vyššia spoľahlivosť vďaka pevnému uloženiu rozvádzacích lopatiek. Všetky dnes bežne využívané spôsoby regulácie turbodúchadiel ponúkajú priestor pre ich ďalší vývoj a do budúcnosti môžeme očakávať príchod nových inovatívnych technológií, nakoľko preplňovanie spaľovacích motorov bude mať v nasledujúcich rokoch stále silnejšie slovo a spolu s hybridnými systémami bude mať výrazný vplyv na automobilový priemysel.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] FERENC, Bohumil. *Spalovací motory: karburátory a vstřikování paliva*. Praha: Computer Press, 2004, 388 s. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 80-251-0207-6.
- [2] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. 9th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009, 794 s. ISBN 978-0-340-56822-4.
- [3] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. Int'l Ed. New York: McGraw - Hill, c1988, 930 s. McGraw-Hill series in mechanical engineering. ISBN 0-07-100499-8.
- [4] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: přeplňování spalovacích motorů*. 2., nezm. vyd. Praha: SNTL, 1985. 134 s.
- [5] MILLER, Jay K. *Turbo: real world high performance turbocharger systems*. 1st ed. North Branch, MN: CarTech, c2008, 160 p. ISBN 19-324-9429-4
- [6] ZDENĚK, J., ŽDÁNSKÝ, B. *Automobily 3, Motory*. 5. vydání. Brno: Avid, 2008. 179 s. ISBN 978-80-87143-06-3.
- [7] Interné podklady poskytnuté firmou Honeywell
- [8] DAHAD, Amey a A. S. JOGLEKAR. Effect of Variable Geometry Turbocharger (VGT) on Diesel Engine. *International Journal of Trend in Research and Development* [online]. 2016, Mar 2016, 3(2) [cit. 2018-05-17]. ISSN 2394 - 9333. Dostupné z: <http://www.ijtrd.com/papers/IJTRD3688.pdf>
- [9] FENELEY, Adam J., Apostolos PESIRIDIS a Amin Mahmoudzadeh ANDWARI. Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 71, 959-975 [cit. 2018-04-23]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.125. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116311807>
- [10] Cummins VGT Variable Geometry Turbocharger. In: *Cummins* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://cumminsengines.com/vgt-turbocharger>
- [11] DUSIL, Tomáš. Turbodmychadla VGT: Naklápění lopatek čtyřikrát jinak. In: *AUTO.CZ* [online]. 28. 3. 2017 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/turbodmychadla-vgt-naklapeni-lopatek-ctyrikrat-jinak-video-104842>
- [12] Holset Variable Geometry Turbochargers. In: *HOLSET Turbochargers* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.myholsetturbo.com/vgt.html>
- [13] How to size a wastegate. In: *Fierce Manual Boost Controllers* [online]. 9 October 2015 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.fiercecontrollers.com/uncategorized/how-to-size-a-wastegate/>
- [14] Internal Wastegate. In: *Turbosmart* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.turbosmart.com/technical-articles/internal-wastegate-faq/>

- [15] JANCO, Marcel. Preplňovanie motora, čo je to turbodúchadlo, ako funguje mechanický kompresor, elektrické turbo, poruchy, spoľahlivosť a zopár rád. In: *Autorubik* [online]. 27. 8. 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/preplnovanie-motora-co-je-to-turboduchadlo-ako-funguje-mechanicky-kompresor-elektricke-turbo-spolahlivost-poruchy-zopar-rad/>
- [16] LÁNIK, Ondřej. Přepřňování (2. díl): turbodmychadla. In: *AUTO.CZ* [online]. 26. 7. 2004 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-2-dil-turbodmychadla-16765>
- [17] Rotary Electric Actuator (REA). In: *Honeywell Transportation Systems* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://turbo.honeywell.com/our-technologies/electric-actuation/>
- [18] Turbine housing A/R and sizing. In: *Honeywell Garrett* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbine_housing_AR_and_housing_sizing
- [19] Turbocharger Bearing Systems. In: *Honeywell Garrett* [online]. 1. 10. 2011 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <https://garrett.honeywell.com/about/turbo-bulletin/tech-corner/turbocharger-bearing-systems/>
- [20] VNT™ DualBoost Turbo. In: *Honeywell Transportation Systems* [online]. 4. 8. 2011 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://turbo.honeywell.com/whats-new-in-turbo/video/vnt-dualboost-turbo/>
- [21] Why do some turbos have wastegates?. In: *BNT Turbo* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.btnturbopartner.com/turboinfo/?id=3>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

A/R	Area/Radius
CAN	Controller Area Network
PWM	Pulse Width Modulation
REA	Rotary Electric Actuator
SREA	Smart Rotary Electric Actuator
VGT	Variable Geometry Turbocharger
VNT	Variable Nozzle Turbine